"EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE CORPUS EN LA OPERACIÓN HIDROENERGÉTICA DE ITAIPU"

ING. JULIO CÉSAR DUARTE GILL
Universidad Nacional del Este - Paraguay
julioduartegill@hotmail.com

ING. DR. ANASTACIO SEBASTIÁN ARCE ENCINA
Entidad Binacional ITAIPU - Paraguay
arce@itaipu.gov.py

RESUMEN

La finalidad del trabajo es evaluar el impacto que producirá la inclusión de la central hidroeléctrica de Corpus, entre las centrales de Itaipu y Yacyreta. Se da especial atención a los efectos en la operación hidroenergética de Itaipu, donde fue demostrado vía simulaciones, los cambios producidos en la generación de energía eléctrica debido a las variaciones del salto bruto y el cambio del comportamiento de la propagación del agua desde Itaipu hasta Corpus. En el trabajo es presentado un modelo de operación de las centrales de Itaipu y Corpus que lleva en consideración diferentes valores de demanda a ser atendida por Itaipu, tiempo de transporte del agua a través de un acoplamiento hidráulico desde el canal de fuga de Itaipu hasta el embalse de la futura central hidroeléctrica de Corpus, pasando por el punto de control del cumplimiento del Acuerdo Tripartito. Así también, en este trabajo se propone las flexibilizaciones en los términos del Acuerdo Tripartito que permitiría aproximar la capacidad de punta de Itaipu de la situación actual.

PALABRAS CLAVES

Generación Hidroeléctrica, Operación Conjunta, Acoplamiento Hidráulico, Potencia en Hora de Punta.

1. INTRODUCCION

Considerando la construcción de la Central Hidroeléctrica de Corpus, previsto en un futuro no muy distante, que la demanda de energía eléctrica está en continuo crecimiento, que los costos operacionales y daños ambientales que acarrean la construcción de nuevas centrales termoeléctricas y que la expansión del sistema eléctrico requiere de complicados análisis, es de suma importancia realizar estudios de planeamiento que permitan aprovechar al máximo el potencial hidroeléctrico.

La operación de un sistema hidroeléctrico es una tarea compleja envolviendo muchas variables e incertidumbres asociadas a las mismas. Para ello se hacen estudios de planeamiento de la operación de largo, medio y corto plazo [2]. En estos estudios se buscan la eficiencia en los procesos de producción, dentro de los límites que imponen las restricciones operativas de los sistemas de generación.

Con el propósito de optimizar la explotación del potencial hidroeléctrico y del parque generador ya instalado sobre el trecho fronterizo del Río Paraná que abarca el Paraguay, Brasil y Argentina, llevando en consideración los términos del Acuerdo Tripartito celebrado en octubre de 1979 [8], que impone restricciones operativas para Itaipu, surge la necesidad de elaborar un estudio de la operación hidroenergética conjunta de las Centrales de Itaipu, Corpus y Yacyreta.

La Central Hidroeléctrica de Itaipu es un aprovechamiento binacional entre el Paraguay y el Brasil, localizado en el Río Paraná, 20 km aguas arriba de la confluencia con el Río Iguazú. La confluencia de los ríos Paraná e Iguazú es tomada como punto de control del cumplimiento del Acuerdo Tripartito, por el cual las variaciones del nivel del Río Paraná, en este punto, no deben superar medio metro de una hora a otra o dos metros de un día a otro, de lo que dependiera de la operación de Itaipu.

El proyecto de la Central Hidroeléctrica de Corpus, emprendimiento binacional entre el Paraguay y Argentina, tiene tres locales probables de emplazamiento sobre el Río Paraná, de los cuales el más indicado es el de Pindo'i, por el menor impacto ambiental y área inundada. El sitio de Pindo'i está aproximadamente a 290 km, aguas abajo de Itaipu. La figura 1.1 muestra la secuencia de usinas hidroeléctricas ubicadas sobre el Río Paraná [1].

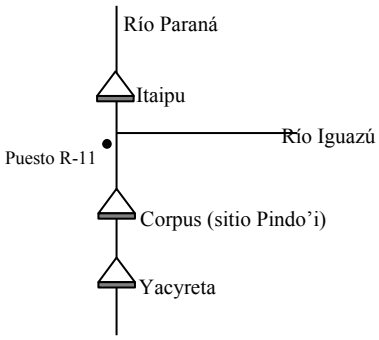

Figura 1.1 - Esquema representativo de las centrales

1.1 Operación conjunta de centrales hidroeléctricas

Debido al acoplamiento hidráulico de las usinas ubicadas en un mismo río, su operación crea una interdependencia entre ellas. La defluencia de la usina de aguas arriba llega a la usina de aguas abajo, pudiendo afectar la operación de esta última positiva o negativamente. La **Figura 1.2** muestra el perfil longitudinal para las tres usinas binacionales: Itaipu, Corpus y Yacyreta, respectivamente. Se puede verificar que los caudales liberados por Itaipu, afectarán a las operaciones de Corpus, al mismo tiempo en que esta afectará a las operaciones de Itaipu por el efecto de remanso.

El objetivo principal de los estudios de la operación conjunta es determinar un régimen de operación de las usinas que resulte en la máxima eficiencia del aprovechamiento de los recursos hídricos. Para el efecto deberán ser evaluados las interacciones de las diferentes variables asociadas a la operación hidroenergética, tales como el tiempo de propagación del agua, el comportamiento del volumen del embalse, de la cota del nivel de canal de fuga, la productividad, etc. También deberán ser evaluadas diferentes condiciones operativas, oriundas de los diferentes escenarios hidrológicos y variaciones de carga. Los resultados de tales estudios permitirán apuntar conclusiones que conduzcan a definir el régimen de operación más adecuado, en términos de eficiencia operativa [4].

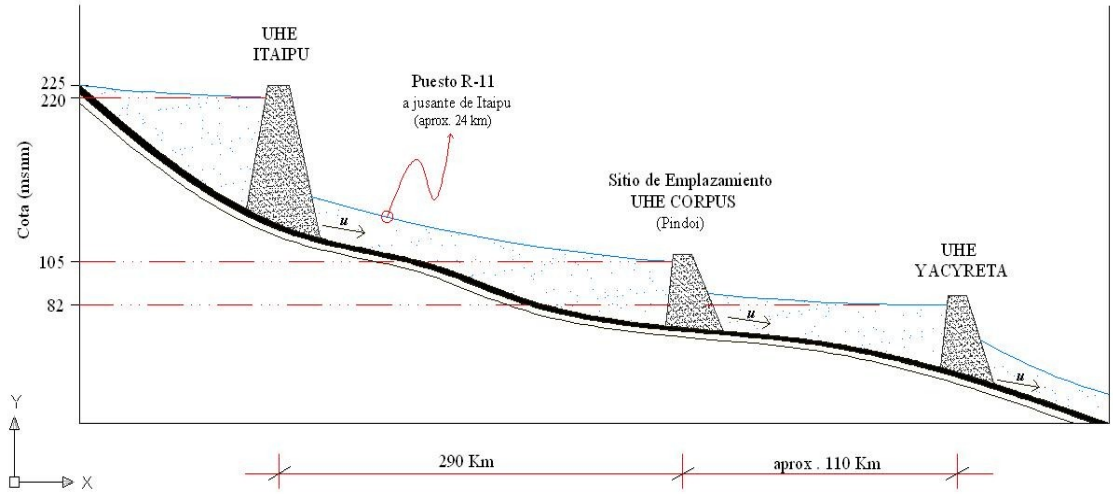

Figura 1.2 - Perfil longitudinal esquemático

2. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES DE SOPORTE AL ESTUDIO Y SIMULADORES DESARROLLADOS

2.1 Software para la computación numérica (*MatLab*)

MatLab® *The Language of Technical Computing*, es un lenguaje de alto desempeño diseñado para realizar cálculos técnicos. Esta herramienta integra el cálculo, la visualización y la programación en un ambiente fácil de utilizar donde los problemas y las soluciones se expresan en una notación matemática [5].

Los simuladores que fueron desarrollados y que serán mostrados en el ítem 2.3, incluyen procesos iterativos de cálculos, y el *MatLab* formó parte, como una herramienta bastante útil para la resolución de este tipo de problema con las propias funciones y comandos del programa, así también, con la posibilidad que ofrece de utilizar subrutinas, de forma a posibilitar el gerenciamiento de los algoritmos ordenadamente.

2.2 Software de simulación de escurrimientos en conductos libres (*CLiv*)

CLiv® *Condutos Livres*, es un software que permite el cálculo del escurrimiento en canales y conductos funcionando a superficie libre. El *CLiv* es un software desarrollado por la Fundación Centro Tecnológico de Hidráulica (FTCH), São Paulo-Brasil, y actúa en el campo de la investigación y desenvolvimiento tecnológico. Uno de los principales objetivos de la FCTH es colaborar con el Departamento de Aguas y Energía Eléctrica del Estado de São Paulo [7].

Los resultados relevantes para el trabajo, proporcionados por el simulador hidrodinámico *CLiv* son caudales (m^3/seg) y niveles de agua (m), ambos en función del tiempo (seg). Con estos datos es posible recaudar informaciones referentes a los niveles y propagaciones del agua en puntos de control como el puesto R-11 y en Corpus. La utilización del simulador permitirá evaluar el impacto desde el punto de vista hidrodinámico y permitir el uso de estos datos para el funcionamiento del software implementado en Matlab, denominado *PropaIRC*. Este programa será descripto en el ítem 2.3

2.3 Simuladores desarrollados *SimOPIC y PropaIRC*

Con el objeto de evaluar todos los aspectos de la operación hidroenergética conjunta de las usinas de Itaipu, Corpus y Yacyreta fueron desarrollados varios programas con diferentes aplicaciones que pasamos a describir. El SimOPICY es un simulador que está en desarrollo aún. El mismo, una vez concluido, permitirá evaluar diferentes reglas de operación conjunta de las tres usinas binacionales.

Dando prioridad al estudio de la evaluación del impacto que la usina de Corpus producirá en la operación hidroenergética de Itaipu fue desarrollado el *SimOPIC* (simulador de la operación Itaipu-Corpus). Este simulador actúa como gerenciador de otras subrutinas, como el *OPI.m* y el *OPC.m* (operación de Itaipu y Corpus respectivamente), rutinas encargadas de controlar el cumplimiento de los límites operativos del nivel de embalse de las centrales, utilizando la ecuación de balance hídrico para el trabajo. Otras subrutinas, como la *OPIcuaturb.m* y *OPCcauturb.m* también fueron desarrolladas. Dentro de sus algoritmos contienen los coeficientes del polinomio "Cota-Volumen" para hallar el nivel del embalse y coeficientes del polinomio del "Factor de Productividad" para hallar la potencia generada y altura bruta de las centrales de acuerdo a un determinado caudal turbinado [3]. Con estas subrutinas y con la ayuda de las subrutinas *IPUcanalfuga.m* y *CPcanalfuga.m*, que también fueron desarrolladas para el *SimOPIC*, se obtienen los niveles de canal de fuga de Itaipu y Corpus, y la cota del embalse de Corpus en la operación conjunta. Las subrutinas *IPUcanalfuga.m* y *CPcanalfuga.m* son las subrutinas que contienen las diferentes curvas, en función del caudal de descarga de la central y el incremento o caudal afluente de Iguazú. Estas curvas abarcan rangos de descargas en la central de Itaipu que van desde 5.000 hasta 30.000 m^3/seg con incrementos desde 200 hasta 30.000 m^3/seg para el caso del *IPUcanalfuga.m*.

El algoritmo del aplicativo *SimOPIC* posee también los datos más relevantes ingresados por el usuario referente a las Centrales Hidroeléctricas en estudio [6];[9], como volumen máximo y mínimo operativo del embalse, número de unidades generadoras, potencia nominal de cada unidad, etc. Entre los datos de entrada, está la afluencia del río Iguazú y los caudales turbinados o defluencias de las centrales, el cual posee dos modalidades de ingreso. La primera, tomada de una base de datos, creado, almacenado por el usuario y reconocido por el *MatLab* como *MAT-files* de extensión *mat.* El segundo, creado por el simulador, como un gerenciador de defluencias, donde ingresando el caudal base y el caudal pico (qbase y qpico en m^3/seg) con sus respectivos tiempos de duración, se simula un periodo de 24 horas, con la posibilidad de repetir según necesidad y a criterio del usuario. Otra función que posee el programa *SimOPIC* es la de gerenciador de resultados que son mostrados en forma de gráficos como:

-Defluencia de Itaipu y Corpus [m^3/seg]

-Caudal en R-11 [m^3/seg]

-Variación de nivel en R-11 (relacionado a las restricciones impuestas por el Tratado Tripartito)

-Cota de embalse de Itaipu y Corpus [m]

-Cota del canal de fuga de Itaipu y Corpus [m]

-Nivel de agua para comparación, en el canal de fuga de Itaipu, R-11 y en el embalse de Corpus [m]

-Altura bruta de Itaipu y Corpus [m]

-Potencia en cada instante y potencia media generada por cada central y total del sistema [MW]

El *PropaIRC* (caudal propagado Itaipu-Corpus) es una de las subrutinas mas destacadas del *SimOPIC*, con este algoritmo es posible estimar el caudal que se tiene a cada instante en R-11, con discretización horaria. Esta subrutina también permite verificar el cumplimiento de las restricciones impuestas por el Acuerdo Tripartito, como las variaciones de nivel de agua tanto horaria como diaria.

La subrutina *PropaIRC* cumple un papel importante para el análisis, pues posibilita el acoplamiento operativo entre las centrales, permitiendo de esta forma evaluar la propagación del agua de la descarga de Itaipu hasta Corpus y evaluar el comportamiento de su embalse. Así también permite verificar el comportamiento del canal de fuga de Itaipu debido a la inclusión de Corpus.

Además de los algoritmos mencionados fueron implementados otros que auxilian el estudio, los más relevantes se resumen en ocho, y son mostrados en el esquema de aplicativos desarrollados de la **Figura 2.1**, donde constituyen subrutinas y el propio gerenciador del simulador desarrollado *SimOPIC*.

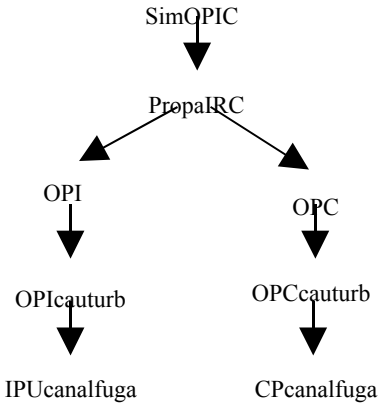

Figura 2.1 - Esquema de aplicativos desarrollados

3. ESTUDIOS DE CASOS

Durante las simulaciones realizadas, se observaron tres fenómenos relacionados con la operación de Corpus. Para el análisis fueron tomados en cuenta estos fenómenos dado que los mismos afectan directamente los niveles de agua en los puntos de observación como el canal de fuga de Itaipu y en el puesto R-11. También tienen efecto en la generación de energía en hora de punta. Para cada caso también se realizó una comparación con la situación actual.

Los fenómenos mencionados son:

a) Debido al perfil en un corte transversal del río, que en niveles inferiores muestra un diseño casi vertical, pero que en niveles superiores esta inclinación es menor, permitiría mayores variaciones de las descargas de Itaipu sin mayores quebrantos para el atendimiento de las restricciones asociadas al Acuerdo Tripartito.

b) Por otro lado, debido al efecto del remanso, se observa que las variaciones de la descarga de Itaipu en R-11 son mucho más rápidas que en la situación actual, sin Corpus. Este punto se refiere los efectos en la propagación del agua.

c) Con la inclusión del embalse de Corpus, se produce un aumento en el nivel del canal de fuga de Itaipu, provocando la disminución de su salto bruto.

En cada simulación se verificó el cumplimiento de todas las restricciones establecidas por el Acuerdo Tripartito, siendo estas las principales para limitar la potencia máxima que se podrá generar en hora de punta, manteniendo un determinado caudal promedio diario.

En la **Figura 3.1** se presenta un gráfico de las propagaciones en R-11, y en ella se puede comparar las curvas de propagación de las variaciones de descarga de Itaipu, con y sin la presencia de Corpus.

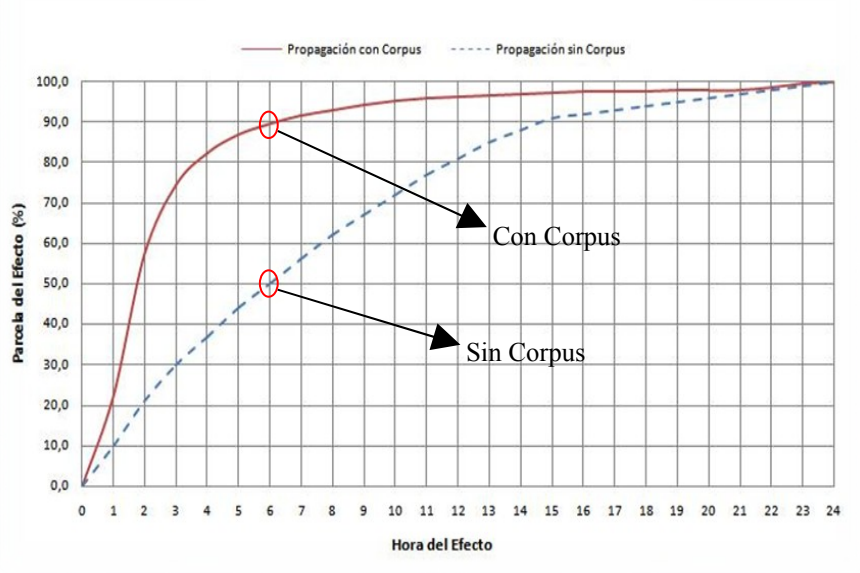

Figura 3.1 - Curva de propagación en R-11

Se puede verificar en la figura, que los efectos de las variaciones de las descargas de Itaipu son más rápidos con Corpus. Se observa en las curvas, que en las propagaciones sin Corpus el 50% del efecto, R-11 siente al cabo de 6 horas, mientras que con Corpus este porcentaje de la variación se verifica en menos de 2 horas. Es posible verificar también que las proporciones son mayores hora a hora con Corpus que sin Corpus, por ejemplo, se puede notar en la figura con los círculos, que en la hora 6 los porcentajes del efecto fueron 50% sin Corpus y 90% con Corpus. Esta rápida propagación resultará en un mayor volumen de agua en menos tiempo, aumentando también el nivel del río. Observando esto, es razonable concluir que para no violar el Acuerdo Tripartito, las operaciones simuladas con Corpus serán imposibilitadas de alcanzar mayores caudales turbinados en hora de punta.

La figura 3.2 muestra los resultados de la simulación con un valor del caudal de descarga promedio diario de Itaipu en 10.000 m^3/s. Se puede observar los picos alcanzados con y sin Corpus. La duración del pico se mantuvo durante 4 horas y el caudal máximo turbinado es mayor para el caso de la operación de Itaipu sin Corpus. Estos caudales máximos alcanzaron valores de 13.663 m^3/s y 14.433 m^3/s con y sin Corpus respectivamente, y la diferencia de caudal que no se pudo turbinar es de 770 m^3/s, es decir 5,33% menos con la inclusión de dicha Central.

Los caudales máximos en hora punta fueron limitados por las variaciones establecidas en el Acuerdo Tripartito [8], por lo tanto, ambas operaciones con y sin Corpus son factibles por R-11. Las simulaciones fueron de 48 horas, con la operación de 24 horas repetida para una mejor observación de las variantes.

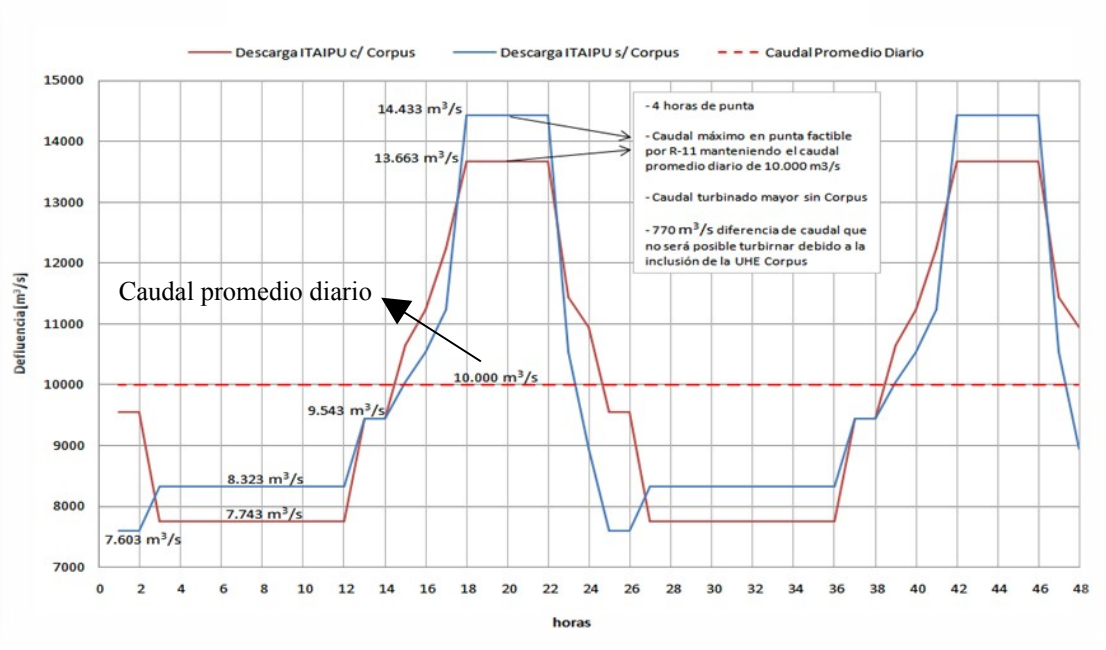
Descarga ITAIPU c/ Corpus
Descarga ITAIPU s/ Corpus
Caudal Promedio Diario
- 4 horas de punta
- Caudal máximo en punta factible por R-11 manteniendo el caudal promedio diario de 10.000 m3/s
- Caudal turbinado mayor sin Corpus
- 770 m³/s diferencia de caudal que no será posible turbirnar debido a la inclusión de la UHE Corpus
14.433 m³/s
13.663 m³/s
Caudal promedio diario
10.000 m³/s
9.543 m³/s
8.323 m³/s
7.743 m³/s
7.603 m³/s
Defluencia [m³/s]
horas

Figura 3.2 - Defluencia de Itaipu factible por R-11. Caudal promedio 10.000 m^3/s

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran las variaciones en R-11 y la potencia generada en hora de punta, respectivamente.

La figura 3.5 muestra los resultados de las simulaciones con y sin Corpus. Las curvas fueron construidas tomando como base las potencias en hora de punta que fueron posibles generar en Itaipu sin quebrantar las restricciones en R-11 con caudales promedios diarios variando de 7.000 a 13.000 m^3/s. En el eje de la ordenada izquierdo se observa las potencias generadas para cada caudal promedio diario. Es notorio que las potencias generadas en las operaciones con Corpus son menores que las generadas sin Corpus. Para un valor de promedio de descarga de 9.000 m^3/s las potencias con y sin Corpus fueron 11.509 y 12.683 MW, respectivamente. La diferencia de generación de 1.174 MW, equivale a la capacidad de más de una máquina. Otra observación importante a destacar es que si se pretende atender una demanda en hora de punta de 12.600 MW, se necesitaría aproximadamente 1.300 m^3/s o más de caudal promedio diario de lo que se necesita actualmente sin Corpus.

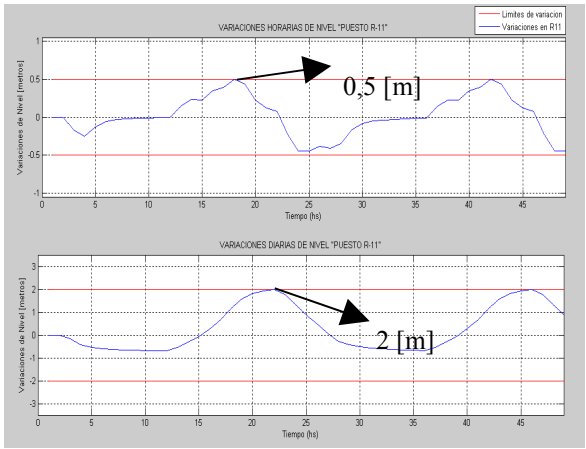

Figura 3.3 - Restricciones en R-11. Caudal promedio 9.000 m^3/s

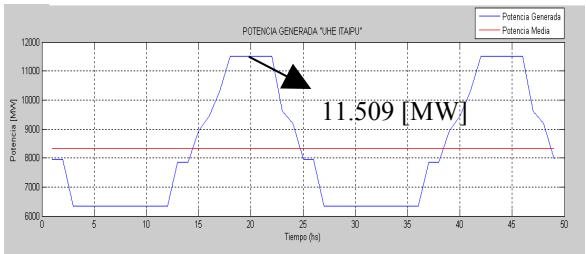

Figura 3.4 – Potencia en hora de punta. Caudal promedio 9.000 m^3/s

Las curvas de líneas discontinuas representan las cotas alcanzadas en el canal de fuga de Itaipu (eje derecho de la figura 3.5). Se puede verificar que con Corpus son más elevados pudiendo variar de 5 a 7,5 metros dependiendo de la operación de Itaipu. Esto provoca una disminución en el salto bruto justificando la menor generación de energía.

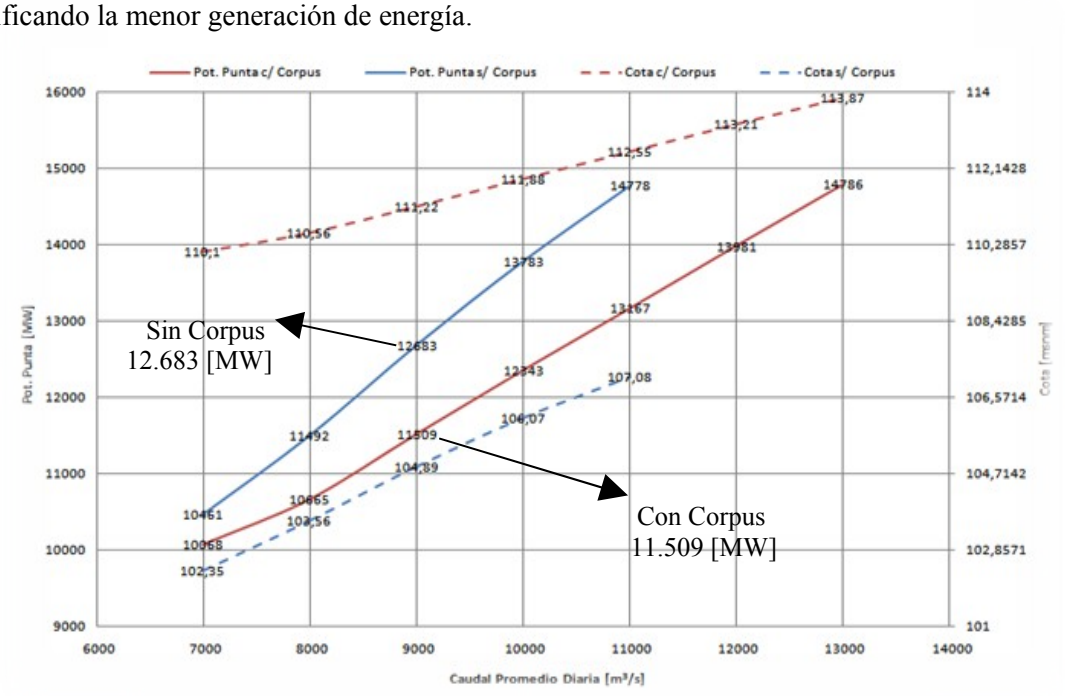

Figura 3.5 – Potencias en hora de punta y cota canal de fuga por caudal promedio diario.

Una propuesta simulado en el *SimOPIC*, que posibilitaría la atención de la demanda en hora de punta actual (sin Corpus) es mostrado a continuación, en donde se propone mayor flexibilidad en las restricciones que impone el Acuerdo Tripartito en el puesto R-11.

Simulando nuevamente la operación de Itaipu con Corpus, para 9.000 m^3/s de caudal promedio diario y flexibilizando las restricciones del Acuerdo Tripartito de ±0,5 para ±0,7 metros de variación horaria y de ±2 para a ±2,7 metros de variación diaria, será posible atender la demanda en hora de punta, conforme se puede verificar en la **Figura 3.6**.

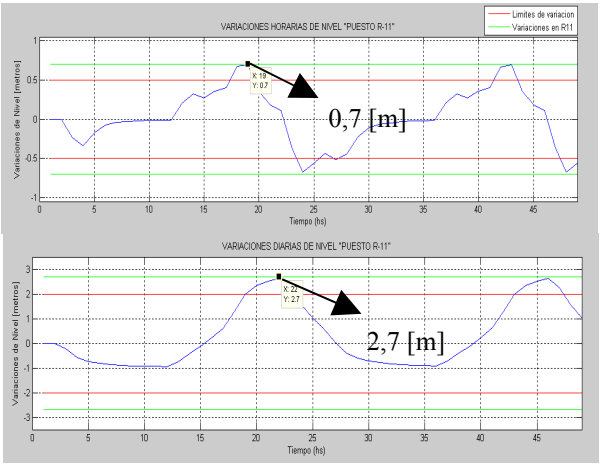

Figura 3.6 - Flexibilizando las restricciones en R-11 con caudal promedio de 9.000 m^3/s

En la **Figura 3.7** es posible observar como son próximas las curvas de potencias en hora de punta sin Corpus y con Corpus flexibilizando las restricciones del Acuerdo Tripartito.

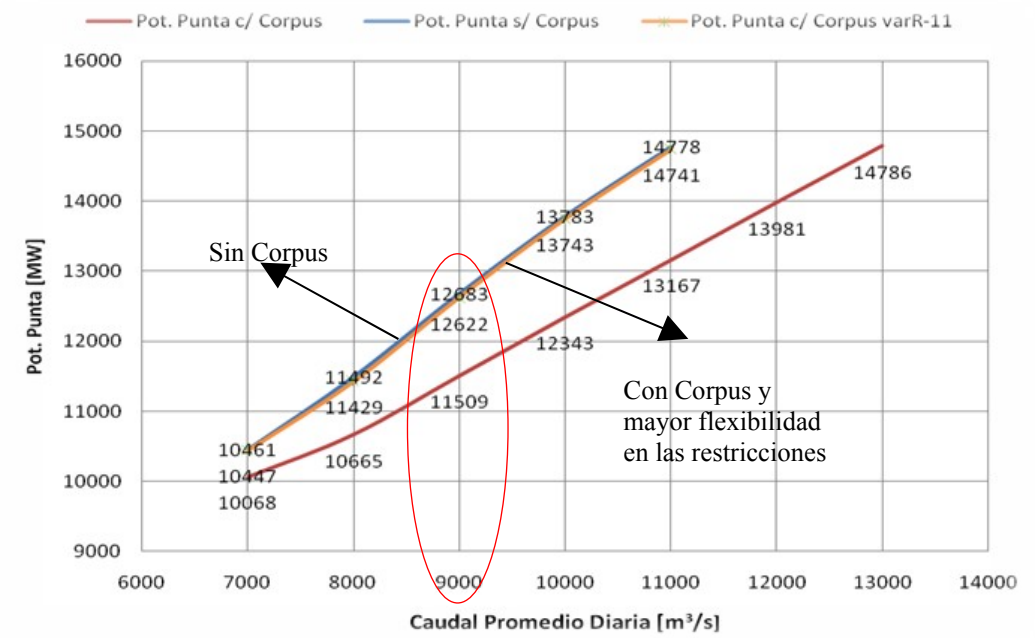

Figura 3.7 - Potencias en hora de punta con Corpus, mayor flexibilidad en las restricciones.

La **Figura 3.8** resume los valores de potencias obtenidas para 9.000 m^3/s de caudal promedio diario. Se puede constatar que la flexibilización de las restricciones del Acuerdo Tripartito contribuirá para mantener la capacidad de punta de Itaipu con Corpus.

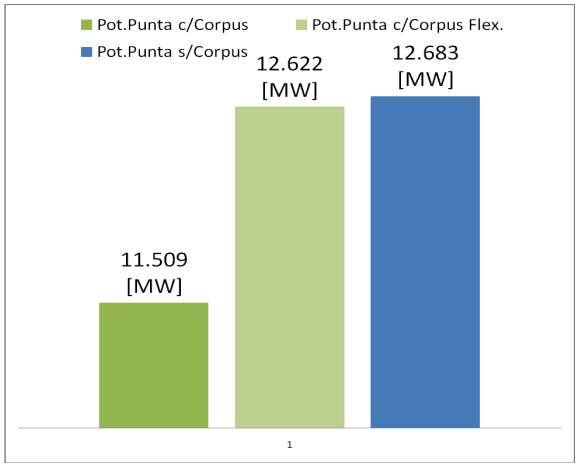

Figura 3.8 - Comparación de potencias en hora de punta para 9.000 m^3/s.

4. CONCLUSION

Sin Corpus, el 50% del efecto de las variaciones de descarga de Itaipu en R-11 se registra al cabo de 6 horas. Con Corpus este porcentaje de variación se registra en menos de 2 horas, por lo que se concluye que la propagación del agua es más rápida con Corpus.

Para 9.000 m^3/s de caudal promedio diario las potencias en hora de punta con y sin Corpus fueron 11.509 y 12.683 MW respectivamente, esto representa una diferencia de capacidad de generación de 1.174 MW menos con Corpus.

En R-11, flexibilizando las restricciones horarias y diarias a 0,7 y 2,7 metros respectivamente, con un caudal promedio diario de 9.000 m^3/s, con la presencia de Corpus la capacidad de punta alcanzaría 12.622 MW, esto posibilitaría aproximar la misma capacidad de punta que la usina de Itaipu cuenta hoy, sin Corpus.

5. REFERENCIAS

[1] **M. A. Cicogna,** "Sistema de Suporte a Decisão para o Planejamento e a Programação de Operação de Sistemas de Energia Elétrica", Tese Doutorado. UNICAMP. cap2, 38-39. 2003.

[2] **S. Soares, T. Oshihi,** "Operação Econômica de Sistemas Hidrotérmicos", CEAPO mód. 7, UNICAMP.

[3] **G. da Cruz J.,** "Planejamento da Operação Energética a Longo Prazo de Sistemas Hidrotérmicos de Potencia", Tese Masterado. UNICAMP. cap2, 5-7. 1994.

[4] **L.A. Terry, M.E.P Maceira, C.V. Mercio, V.S. Duarte,** "Equivalent Reservoir Model for Hydraulic Coupled Systems", IX SEPOPE. May 2004.

[5**] M. C., J. J. Elizondo,** "MatLab e Interfaces Gráficas", CONATEC Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. 2002.

[6] **Central Hidroeléctrica de ITAIPU,** "Documento de Referencia de las Magnitudes Hidroenergéticas", Departamento de Operación de Sistema OPS.DT. 2002.

[7] **Manual del Usuario**, "Fundación Centro Tecnológico de Hidráulica (FTCH)", Curitiba. 1990.

[8] **Divisão de Atos Internacionais Brasil-Argentina-Paraguay,** "Acordo sobre Cooperação Técnico-Operativo entre os Aproveitamentos de ITAIPU e CORPUS".

[9] **Consorcio Lahmeyer-Harza y Asociados COMIP,** "Estudio del Aprovechamiento del Río Paraná en el Tramo Comprendido entre la Desembocadura del Río Iguazu y la Sección Encarnación-Posadas con Particular Atención en la Zona de Corpus" Estudio de Factibilidad. Tomo 2. Julio 1982.